

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛИНЕЙНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ТОКОПРОВОДЯЩИМ СЛОЕМ НА БЕГУНЕ

*Отримані електромеханічні тягові характеристики лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) зі струмопровідним шаром на бігуні, показники які були розраховані за допомогою чисельного методу кінцевих елементів за програмою FEMM та підтверджені експериментальним шляхом.*

*Получены электромеханические тяговые характеристики линейного асинхронного двигателя (ЛАД) с токопроводящим слоем на бегуне, величины которые были рассчитаны численным методом конечных элементов по программе FEMM и подтверждены экспериментальным путем.*

### ВВЕДЕНИЕ

Применение линейного асинхронного электродвигателя для привода рабочего органа, например, манипуляторов, дозаторов, толкателей, разъединителей, ударных механизмов и т.д. [1, 2, 3, 4], является актуальной задачей.

В настоящее время для определения электромеханических параметров электрических машин и их характеристик широко применяется численный метод конечных элементов [5]. Этот метод может быть использован и для расчета электромеханических характеристик линейного асинхронного электродвигателя [6].

Как правило, существующие стенды для испытания ЛАД [7] недостаточно эффективны и при снятии экспериментальных параметров имеют значительную погрешность в определенных электромеханических характеристиках двигателя.

Таким образом, целью данной работы является расчет электромеханических характеристик линейного асинхронного двигателя с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов, а также разработка методики экспериментального исследования ЛАД на автоматизированном испытательном стенде, разработанном авторами данной работы [8].

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАД

Автоматизированный стенд для испытания и контроля электромеханических характеристик линейного асинхронного электродвигателя с токопроводящим слоем на бегуне изображен на рис. 1. На рис. 2 изображена блок-схема электрическая стенда для автоматизированного контроля электромеханических параметров ЛАД. Схематическое конструктивное изображение ЛАД представлено на рис. 3.

Предложенный автоматизированный стенд для испытания ЛАД (см. рис. 1) содержит: 1- линейный асинхронный электродвигатель; 2 - контрольно-измерительную аппаратуру; 3 - привод подвижной рамки с датчиком (ИД).

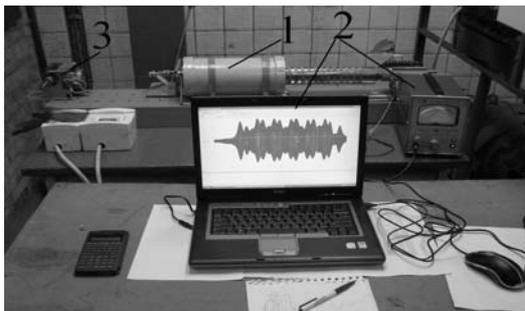


Рис. 1. Автоматизированный стенд для испытания линейного асинхронного электродвигателя

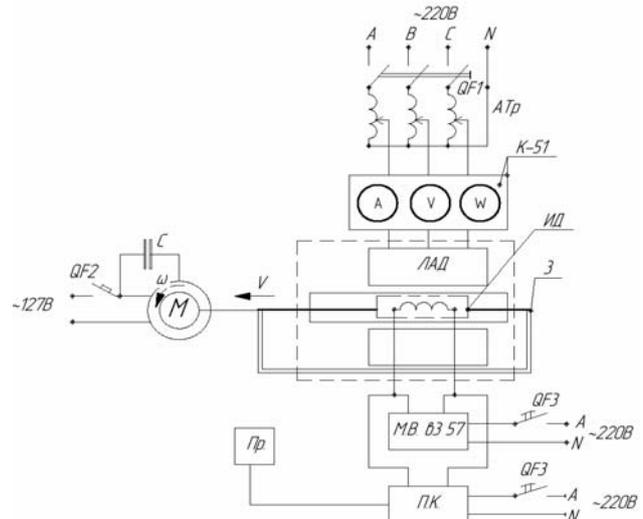


Рис. 2. Блок-схема электрическая стенда для испытания ЛАД

Блок-схема электрическая стенда для испытания ЛАД (см. рис. 2) включает: линейный асинхронный двигатель; электропривод (М) подвижной рамки 3 с индуктивным датчиком (ИД); автотрансформатор (АТр); комплект измерительных приборов К-51; милливольтметр (МВ) ВЗ-57; персональный компьютер (ПК) и принтер (Пр), а также автоматические выключатели QF1, QF2, и QF3.

Линейный асинхронный двигатель (см. рис. 3) состоит из: магнитопровода статора 4 цилиндрической формы с зубцовой структурой в виде разрезных шайб 5; статорной обмотки 6 в виде катушек; магнитопровода бегуна 7 с токопроводящим слоем на бегуне 8.

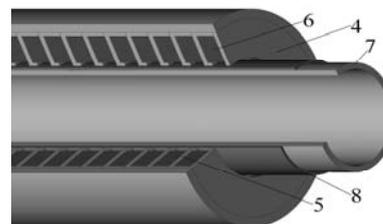


Рис. 3. Конструктивное изображение ЛАД

Исследуемый коаксиально – линейный асинхронный двигатель имеет следующие электромеханические и конструктивные параметры: номинальная мощность  $P_2=1,5$  кВт; подводимое напряжение  $U_\phi=127$  В; частота сети  $f=50$  Гц; пусковой ток  $I_n=10$  А; электромагнитное тяговое усилие  $F_{эм}=300$  Н; масса статора  $m_1=19,2$  кг; масса бегуна  $m_2=13,6$  кг; магнитный зазор  $\delta=2,5$  мм; толщина токопроводящего слоя бегуна  $\Delta h=1,5$  мм; число витков фазы статорной

обмотки  $W_1=80$ ; сечение проводника  $\Delta S_{ст}=1,12 \text{ мм}^2$ ; схема соединений начала и концов обмоток статора соответствует AZZBXCYU.

Индуктивный датчик (ИД) закреплен на текстолитовой ленте подвижной рамки 3. Датчик ИД имеет  $W_{им}=10$  витков, уложенных в виде квадратной катушки размером  $\Delta S_{ид}=10 \times 10 \text{ мм}^2$ .

Концы индуктивного датчика ИД подключены к милливольтметру ВЗ-57 и персональному компьютеру.

Определение магнитной индукции  $B_\delta$  в воздушном зазоре между активной частью статора и бегуна является одна из основных величин при расчете электромагнитного тягового усилия ЛАД.

При экспериментальном исследовании ЛАД с целью получения значений магнитной индукции в воздушном зазоре между зубцовой зоной магнитопровода статора и активной частью бегуна с токопроводящим слоем двигателя под воздействием привода М подвижной рамки. Исследования ЛАД проводились в режиме короткого замыкания, т. е. при заторможенном бегуне. Датчик ИД протарирован согласно [9], а также с применением некоторых положений из [10, 11] по определению магнитной индукции.

Тогда действующее значение ЭДС в индуктивном датчике ИД определяется из выражения:

$$E=4,44f_1 W_{ид} \Phi_{max}, \quad (1)$$

где  $f_1$  – частота сети, Гц;  $W_{ид}$  – число витков индуктивного датчика ИД;  $\Phi_{max}$  – максимальное значение магнитного потока, Вб. Следовательно, магнитный поток  $\Phi_{max}$  определяется по формуле:

$$\Phi_{max}=E/4,44f_1 W_{ид}, \quad (2)$$

а значение магнитной индукции  $B_\delta$  – по формуле:

$$B_\delta=\Phi_{max}/\Delta S_{ид}, \quad (3)$$

где  $\Delta S_{ид}$  – площадь катушки индуктивного датчика ИД,  $\text{мм}^2$ .

Включение и отключение подачи электрической энергии для питания ЛАД, привода М подвижной рамки с датчиком ИД и контролирующей аппаратуры осуществляется при помощи автоматических выключателей QF1, QF2 и QF3 при соответствующей технологической последовательности проведения испытания ЛАД (см. рис. 2). При помощи автотрансформатора АТр устанавливается выходное напряжение питания двигателя.

Магнитное поле статора наводит в обмотке датчика ЭДС, действующее значение которой  $E$  фиксируется на шкале милливольтметра ВЗ 57. Полученные значения параметров магнитной индукции автоматически обрабатываются на персональном компьютере ПК, а распечатка осуществляется на принтере Пр. Картина распределения магнитной индукции  $B_\delta$  вдоль зубцовой зоны  $Z$  статора отражена на дисплее персонального компьютера.

График распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора  $B_\delta=f(Z)$ , полученный экспериментальным путем, изображен на рис. 4 а.

Для подтверждения значений полученной магнитной индукции были проведены расчеты численным методом с помощью программы FEMM [5].

Задача решалась в цилиндрической системе [6] координат в плоскости  $roz$ , которая осесимметрична для векторного потенциала  $A$ , имеющего единственную  $\Phi$ -компоненту.

Из дифференциальных уравнений Максвелла для квазистационарного магнитного поля:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{j}, \quad \text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0, \quad \text{div } \mathbf{j} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

и уравнения состояния магнитного материала, записанного в виде:

$$\mathbf{B} = \mu_{eff}(\mathbf{B}) \cdot \mathbf{H}, \quad \mathbf{j} = \sigma [\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}], \quad (5)$$

получим уравнение для векторного магнитного потенциала  $A$ , при неподвижном бегуне  $\mathbf{v} = 0$  имеет вид [9]:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_{eff}(\mathbf{B})} \text{rot } A \right) = -j\omega \sigma A + \mathbf{J}_{стр}. \quad (6)$$

Здесь  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $H$  – напряженность магнитного поля, А/м;  $B$  – магнитная индукция, Тл;  $J_{стр}$  – плотность тока в обмотке статора, А/мм<sup>2</sup>;  $\mu_{eff}(B)$  – эффективная магнитная проницаемость, зависящая от  $B$ , Г/м;  $j$  – плотность тока, А/м<sup>2</sup>;  $j$  – мнимая единица;  $\omega$  – угловая частота, рад/с;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость токопроводящего слоя на бегуне (медь), См/м.

На рис. 4 б показан график распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора  $B_\delta=f(Z)$ , полученного в результате расчетов на программе FEMM.

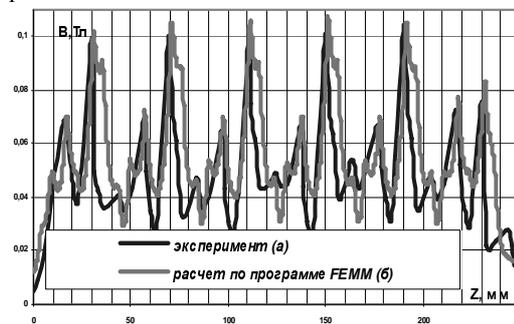


Рис. 4. Графики распределения магнитной индукции вдоль зубцовой зоны статора  $B_\delta=f(Z)$ : а) – экспериментальным путем, б) – расчетным

Равномерный всплеск индукции на межфазных зубцах указывает, что фазные зоны были одинаковыми.

Анализируя графики зависимости  $B_\delta=f(Z)$  (см. рис. 4), можно сделать следующие выводы: сходимость экспериментальных и расчетных значений магнитной индукции составляет 95÷96%; провалы на графиках  $B_\delta=f(Z)$  обусловлены зубцовой структурой магнитопровода статора ЛАД; в крайних зонах активной части магнитопровода статора магнитное поле ослабевает из-за разрыва магнитной цепи. Максимальное значение индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  зафиксировано на участках зубцовой зоны магнитопровода статора и составляет 0,11 Тл.

На рис. 5 показано распределение силовых линий модуля магнитной индукции  $|B|$  вдоль активной части магнитопровода статора и бегуна ЛАД при плотности тока в обмотке статора 5 А/мм<sup>2</sup>.

Здесь 1 – зубец магнитопровода статора ЛАД, 2 – спинка магнитопровода, 3 – магнитопровод бегуна, 4 – токопроводящий слой бегуна.

Из картины распределения магнитной индукции (см. рис. 5) видно, что максимальное значение индукции достигается в угловых зонах зубцов магнитопровода статора и составляет 1,9 Тл.

При определении параметров тягового усилия, развиваемого ЛАД, экспериментальным путем статор двигателя был закреплен на станине стенда, а бегун соединен через динамометр со спинкой данного стенда. Питание ЛАД осуществлялось по схеме, представленной на рис. 2. При питающем линейном напряжении обмоток статора ЛАД  $U=127$  В, плотность тока  $j = 5$  А/мм<sup>2</sup>, коэффициент заполнения паза  $K_{п}=0,35$ , а

пусковое тяговое усилие двигателя  $F_H=300$  Н.

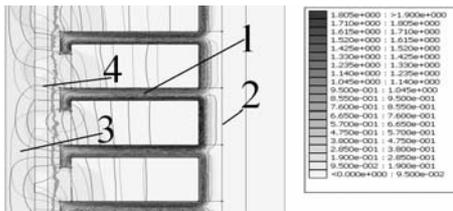


Рис. 5. Распределение модуля магнитной индукции  $|B|$  ЛАД

При расчетах электромагнитного тягового усилия, развиваемого ЛАД, необходимо, кроме геометрических параметров двигателя, учитывать соединение начала и концов катушек статорной обмотки в зависимости от толщины токопроводящего слоя бегуна  $F_{эм}=f(\Delta h, f_0)$ .

Расчеты проводились согласно закону регулирования  $U/f=\text{const}$  [4, 10].

В данной работе электромагнитной силы ЛАД, действующей на бегун, рассчитывались при помощи программы FEMM на основании тензора натяжения Максвелла  $T$  согласно следующему выражению [9]:

$$F_{эм} = \int_S \mathbf{n} T dS, \quad (7)$$

причем вычислялась осевая компонента силы. Здесь  $\mathbf{n}$  - единичный вектор внешней нормали к поверхности бегуна  $S$ , м<sup>2</sup>.

На рис. 6. изображено семейство расчетных электромагнитных характеристик ЛАД  $F_{эм}=f(\Delta h, f_0)$ . То есть зависимость электромагнитного тягового усилия  $F_{эм}$ , развиваемого двигателем, от толщины токового слоя  $\Delta h$  при различных частотах питающей сети  $f_0$ , а также при различных соединениях начала и концов трехфазной обмотки статора ЛАД.

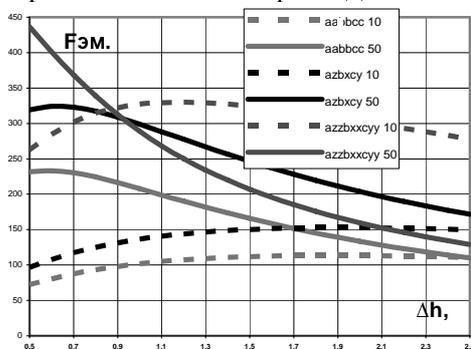


Рис. 6. Семейство электромагнитных характеристик ЛАД  $F_{эм}=f(\Delta h, f_0)$

Из анализа графиков зависимости  $F_{эм}=f(\Delta h, f_0)$  (см. рис. 6) при различных соединениях начала и концов трехфазной обмотки статора ЛАД следует, что наибольшее значение тягового усилия  $F_{эм}=325$  Н имеет место при частоте питания тока обмоток статора  $f=10$  Гц, толщине токового слоя бегуна  $\Delta h=1,2$  мм и схеме соединения начала и концов обмоток статора AZZBXXCYU.

### ВЫВОДЫ

Полученные результаты при расчете электромагнитных характеристик ЛАД с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов позволили с большой вероятностью приблизиться к экспериментальным данным. Ошибка составляет 4÷5%.

Предложенный стенд и методика испытания линейных асинхронных электродвигателей с токопрово-

дящим слоем на бегуне позволяют автоматически фиксировать величины электромагнитных характеристик, магнитную индукцию  $B_\delta$  в воздушном зазоре.

Неравномерное распределение магнитной индукции в воздушном зазоре между активной частью магнитопровода статора и бегуна связано с Г-образным профилем полюсного концентратора (зубца) исследуемого двигателя.

Исследования электромагнитных характеристик методом конечных элементов позволили оперативно и с большой точностью рассчитать электромагнитные характеристики двигателя, которые близки к экспериментальным.

Полученные результаты по исследованию ЛАД с токопроводящим слоем на бегуне дают основание для дальнейшего развития и усовершенствования конструкции линейного асинхронного двигателя и его параметров с целью применения ЛАД в качестве привода рабочих органов возвратно – поступательных устройств и, в частности, строительных машин и механизмов ударного действия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на корисну модель № 23757 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голєнков Г.М., Попков В. С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 11.06.2007.
2. Декларацийний патент на корисну модель заявка № а 2006 13644 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голєнков Г.М., Попков В.С., Електродвигун зворотньо-поступального руху. Україна Оpubл. від 22.12.2006.
3. А.С. №137579 (СССР). Голєнков Г.М. и др. Электромагнитный молот для забивки свай. Оpubл. В БИ №7 1998.
4. Веселовский О.Н. Линейные асинхронные двигатели. М. Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
5. <http://femm.foster-miller.net>
6. Голєнков Г.М., Веремеєнко А. В. Оптимізація параметрів лінійного асинхронного двигателя с токопроводящим слоем на бегуне методом конечных элементов."Электротехника и электромеханика". Научно – практичний журнал. Харків. НТУ "ХПІ" №5, 2007. - С. 9-12.
7. Ямамура С. Теория линейных асинхронных двигателей. Л. Энергоатомиздат, 1983. 180 с.
8. Патент на корисну модель № 29884 Богаєнко Е.М., Богаєнко М.В., Веремієнко А.В., Голєнков Г.М., Попков В.С., Стенд для випробування лінійних електродвигунів. Україна. Оpubл. від 25.01.2008.
9. Шимони К. Теоретическая электротехника. Мир, 1964. 774 с.
10. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.2 – Машины переменного тока. Учебник для студентов высших техн. учеб. заведений. Изд. 3-е перераб. Л.: "Энергия", 1973. 648 с.
11. Гольдберг О.Д., Гури́н Я. С., Сви́риденко И.С. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. Под редакцией О.Д. Гольдберга. - М. Высшая школа, 1984. 432 с.

Поступила 24.10.2008

Голєнков Геннадий Михайлович, к.т.н., доц.,  
Веремеєнко Андрей Владимирович,  
Киевский национальный университет строительства  
и архитектуры  
Украина, 03037, Киев, пр. Воздухофлотский 31, КНУСА,  
кафедра электротехники и электропривода  
тел. (044) 241-55-65

Богаєнко Николай Владимирович,  
Попков Владимир Сергеевич  
Научно-внедряющее предприятие  
"Промелектрооборудование"  
Украина, 03179, Киев, ул. Ирпенская, 63а/125  
тел. (044) 459-52-42